

Méthode optimale de calcul des courants de court-circuit dans un réseau de distribution électrique

S. HOUNDEDAKO¹, Tometin D. DAÏ¹, A VIANOU¹ et Ch. ESPANET²

¹Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication et d'Informatique Appliquée (LETIA)
Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin

²FEMTO-ST Département Energie, Université de Franche-Comté, France

* Correspondance, courriel : hounde2003@yahoo.fr

Résumé

La complexité du calcul des courants de court-circuit réside essentiellement dans la détermination de la valeur de l'impédance du réseau en amont du point de défaut. Il est ainsi évident qu'on ne peut pas se fier à la méthode traditionnelle qui consiste à situer le défaut en tête de départ pour le courant de court-circuit maximum et en bout de ligne pour le courant de court-circuit minimum lorsqu'il s'agit d'un réseau de distribution électrique publique. Les objectifs poursuivis par les auteurs dans cet article, est dans un premier temps de déterminer les valeurs précises des courants de court-circuit minimum et maximum par départ de la portion de réseau « COTONOU EST » de la Société Béninoise d'Energie Electrique, puis d'étudier ensuite la méthode optimale de calcul des courants de court-circuit dans un réseau de distribution électrique publique. Il a donc été question entre autres d'apprécier la fiabilité des résultats issus d'un calcul analytique lorsqu'on ne dispose pas d'outils de simulation adéquats des réseaux de distribution électrique. La méthode numérique de calcul des courants de courant circuit que les auteurs proposent ici a nécessité la modélisation et des simulations du réseau étudié avec Neplan, un logiciel de référence des réseaux de distribution électrique.

Mots-clés : *energie électrique, courant de court-circuit, impédance de réseau, méthode numérique, logiciel NEPLAN.*

Abstract

Optimal method of calculation of short-circuit in a power distribution network

The complexity of the calculation of the currents of short-circuit lying primarily in the determination of the value of the impedance of the network upstream of the point of defect, it seems obvious that one cannot trust with the traditional method which consists in locating the default at the head feeder for the current of maximum short-circuit and in end of line for the current of minimum short-circuit when it is about an electric public distribution network. The aims in view by the authors in this article, is in a first to determine the precise values of the currents of minimum and maximum short-circuit by feeder of the portion of network "COTONOU EST" of the Beninese Company of Electrical energy, then to study the optimal method of calculation of the currents of short-circuit in an electric public distribution network.

It was thus question inter alia appreciating the reliability of the results resulting from an analytical calculation when one does not have adequate tools for electric simulation of the distribution networks. The numerical method of calculation of the currents of current circuit required the modeling and of simulations of the network studied with Neplan, power software of the distribution networks.

Keywords : *electric power, short-circuit current, impedance network, numerical method, NEPLAN software.*

1. Introduction

L'optimisation de la gestion d'un réseau de distribution électrique est liée à une meilleure coordination des protections dans le réseau. Un bon plan de protection dans le réseau, permet en effet de réduire considérablement les temps d'interruption suite aux défauts et contribue aussi à la réduction des pertes techniques en évitant la circulation des courants de défaut qui provoquent plus de pertes joules. Cependant, il requiert entre autres de moderniser la gestion du réseau par la télé-conduite. Le calcul des courants de court-circuit est une étape préliminaire, indispensable au réglage des valeurs-seuil des relais de protection dans le réseau pour un déclenchement plus rapide. La connaissance des courants de défaut maximum et minimum dans le réseau est nécessaire pour un bon choix des équipements de protection afin de limiter leur destruction et prolonger leur durée de vie. Cela assure aussi la protection des personnes. A cet effet, on assiste de plus en plus à la conception d'équipements de protection avec un temps de réponse rapide. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi la méthode optimale de calcul des courants de court-circuit avec son application sur le réseau existant « Cotonou Est » de la Société Béninoise d'Energie Electrique (SBEE). Dans leur recherche, plusieurs auteurs ont abouti à des résultats satisfaisants. Les méthodes utilisées dans [7] et [9] sont très appréciables du point de vue précision et fiabilité de calcul.

2. Matériel et méthodes

2-1. Démarche analytique

La méthode utilisée est la méthode des impédances qui est la méthode la plus courante. Elle permet de déterminer la valeur d'un courant de court-circuit en un point quelconque en totalisant les résistances et réactances de la boucle de défaut depuis la source jusqu'au point considéré et en calculant l'impédance équivalente. Les valeurs de court-circuit sont alors calculées par application de la loi d'Ohm (formule générale):

$$I_{cc3} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \times Z_{cc}} \quad (1)$$

$$I_{cc2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc3} \quad (2)$$

U_0 : Tension entre phases au point considéré

Z_{cc} : Impédance du circuit en amont du défaut

I_{cc2} : Courant de court-circuit biphasé

I_{cc3} : Courant de court-circuit triphasé

Puisque le calcul est analytique, le défaut donnant le courant de court-circuit maximum est supposé triphasé et généralement situé en tête de départ comme il est le cas dans le guide technique de Schneider qui est plus destiné aux réseaux industriels. Quant au défaut biphasé donnant le courant de court-circuit minimum, il est situé en bout de ligne [5]

2-2. Démarche numérique

Le comportement d'un réseau électrique pendant un court-circuit peut être représenté par un réseau équivalent composé d'une source de tension avant le défaut et de l'impédance du réseau Zk_i pour la séquence du système directe, inverse et homopolaire au nœud du défaut. Les éléments d'entrée, tels que les départs du réseau, les générateurs et les moteurs asynchrones, sont modélisés par une impédance Z_e et leur source de tension. Pendant le calcul, ils seront changés en sources de courant équivalent. Considérant la structure symétrique et l'alimentation du réseau électrique, les composants symétriques sont seulement reliés à l'endroit du défaut. L'interconnexion sera définie par les équations de défaut. Les équations dépendent du type de défaut :

- Défaut triphasé

$$Ik_1'' = \frac{U0_k}{Zk_1} \tag{3}$$

$$Ik_2'' = 0 \tag{4}$$

$$Ik_0'' = 0 \tag{5}$$

- Défaut biphasé

$$Ik_1'' = \frac{U0_k}{Zk_1 + Zk_2} \tag{6}$$

$$Ik_2'' = -Ik_1'' \tag{7}$$

$$Ik_0'' = 0 \tag{8}$$

Avec :

$U0_k$: Tension de service ou tension avant le défaut au nœud k

Zk_i : Impédance du réseau au nœud en défaut du système directe ($i=1$), inverse ($i=2$), et homopolaire ($i=0$).

2-3. Algorithme

Après la modélisation de tout, le réseau a été étudié en quatre étapes :

- calcul de la tension équivalente au point de défaut
- détermination et sommation des impédances équivalentes directe, inverse, et homopolaire amont au point de défaut
- calcul du courant de court-circuit initial, à l'aide des composantes symétriques
- détermination des autres grandeurs caractéristiques à partir du calcul de la valeur efficace du courant de court-circuit initial (I_k''),

- i_p , la valeur de crête,
- i_b , la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique coupé,
- i_{cc} , la composante apériodique,
- i_k , la valeur efficace du courant de court-circuit permanent.

2-3-1. Méthode de calcul de la tension équivalente utilisée pour les courants de court-circuit maximum

Pour les courants de court-circuit maximum, nous avons utilisé la norme IEC60909 2001. Cette norme s'applique à tous les réseaux, radiaux et maillés, jusqu'à 550 kV. Basée sur le théorème de THEVENIN, elle consiste à calculer une source de tension équivalente au point de court-circuit pour ensuite déterminer le courant en ce même point. Toutes les alimentations du réseau sont remplacées par leurs impédances (directe, inverse et homopolaire). Avec cette méthode, toutes les capacités de ligne et les admittances en parallèle des charges non tournantes, sauf celles du système homopolaire, sont négligées. La tension équivalente au point de défaut égale à: $c \cdot U_n / \sqrt{3}$.

Avec c , un facteur de tension dont l'introduction dans les calculs est nécessaire pour tenir compte :

- ✓ des variations de tension dans l'espace et dans le temps,
- ✓ des changements éventuels de prise des transformateurs.

2-3-2. Méthode de calcul de la tension équivalente pour les courants de court-circuit minimum

Pour le calcul des courants de court-circuit minimum, nous avons utilisé la méthode de superposition, avec répartition de puissance. Elle prend en compte les tensions réelles, juste avant le court-circuit, lesquelles sont calculées par la méthode de Newton-Raphson Étendu (bilan de puissance).

2-4. Algorithme de Newton-Raphson

La méthode Newton-Raphson démarre de l'équation d'erreur pour le nœud du réseau i :

$$\Delta S_i = (P_i - j \cdot Q_i) - U_i \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* \cdot U_k^* \quad (9)$$

Les tensions complexes U_k doivent être trouvées telles que l'erreur ΔS_i devienne zéro.

P_i et Q_i sont les puissances active et réactive prédéfinies. Y_{ik} est un élément de la matrice Y de la i -ième ligne et de la k -ième colonne. La solution de l'équation d'erreur ci-dessus consiste en trois étapes:

- Calcul de l'erreur de puissance avec l'aide des tensions de chaque nœud :

$$\Delta S_i = S_{vor_i} - S_{ber_i} \quad (10)$$

- Calcul des variations de tension pour chaque nœud avec la matrice jacobienne J

$$\Delta U = J^{-1} \cdot \Delta S \quad (11)$$

- Calcul des tensions aux nœuds

$$U_{neu_i} = U_{alt_i} - \alpha \cdot \Delta U_i \quad (12)$$

Ces trois étapes d'itération démarrent avec $U=1.0$ pu ou une valeur prédéfinie et continuent jusqu'à ce que le critère de convergence soit atteint :

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n |\Delta S_i| \quad (13)$$

2-5. Modélisation du réseau étudié

2-5-1. Modélisation et représentation du réseau étudié

Le réseau « COTONOU EST » de la SBEE (**Figure 1**) est le réseau électrique de Cotonou, qu'alimentent les départs du poste source d'Akpakpa. Il comporte 230 postes H61 (transformateurs HTA/BT) et 620 nœuds.

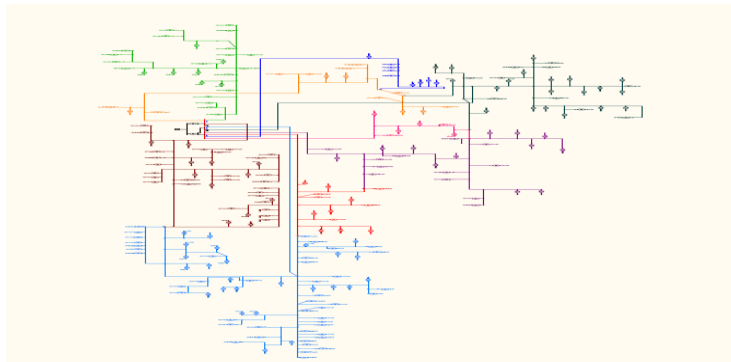


Figure 1 : Réseau « Cotonou Est » de la SBEE

2-5-2. Représentation du poste d'Akpakpa avec le logiciel Neplan

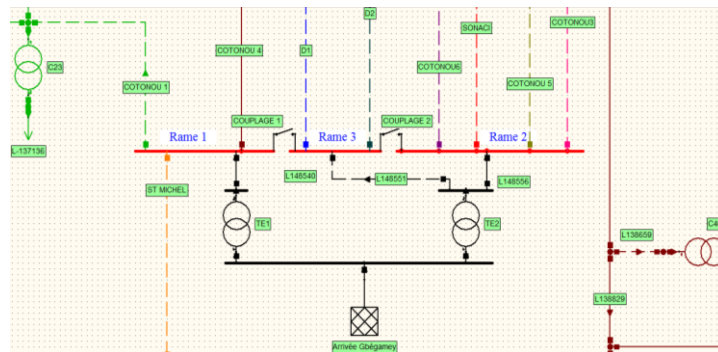


Figure 2 : Poste source d'Akpakpa

Le poste source d'Akpakpa (**Figure 2**) dispose de trois (03) rames (Rame 1, Rame 2, Rame 3), alimentées par deux transformateurs HTB/HTA nommés TE 1 de puissance 20 MVA et TE 2 de puissance 31,5 MVA. En régime normal d'exploitation, lorsqu'aucun couplage n'est fermé, TE 1 alimente la rame 1, tandis que TE 2 alimente les rames 2 et 3. Il y a une possibilité de coupler les rames 1 et 3 en fermant l'interrupteur de couplage 1, les rames 2 et 3 en fermant l'interrupteur de couplage 2. Le poste source d'Akpakpa a 9 départs qui sont : Cotonou1, Cotonou3, Cotonou4, Cotonou5, Cotonou6, St Michel, D1, D2 et Sonaci.

2-5-3. Simulation et Validation du modèle avec le logiciel NEPLAN

Pour valider le modèle, nous avons :

- ✓ comparé la charge totale simulée par départ, aux données des relevés de quart à la même heure que l'heure des campagnes de mesure des charges par transformateurs
- ✓ comparé la valeur simulée du $\cos\Phi$ global par départ au $\cos\Phi$ mesuré pendant le quart

Le **Tableau 1**, résume la comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs réelles .

Tableau 1 : Comparaison entre les consommations réelle et simulée

	Consommation réelle			Consommation simulée			Ecart en %		
	P (MW)	Q (MVAR)	Cos Φ	P (MW)	Q (MVAR)	Cos Φ	P	Q	Cos Φ
Totale	24,18	13	0,887	24,6	13,728	0,88	1,7	5,3	0,8
TE 1	7,5	4,6	0,85	9,425	6,334	0,83	20	22,6	2,3
TE 2	17,1	8,2	0,90	16,036	4,973	0,89	6,2	39,3	1,1

On constate donc que l'erreur relative entre le modèle simulé et le modèle réel est faible globalement quand on procède à une analyse de la première ligne du tableau qui constitue la puissance totale consommée sur le réseau. Nous pouvons à partir de ces résultats valider notre modèle.

3. Résultats

Pour différentes configurations des rames de la centrale, nous avons calculé les courants de court-circuit maximum réels dans le réseau, de même que ceux qu'on obtiendrait approximativement si le calcul était fait manuellement. C'est-à-dire que le courant de court-circuit minimum est obtenu pour un défaut situé en bout de ligne et le maximum pour un défaut en tête de départ. Les résultats qui vont suivre sont très fiables, et peuvent donc être exploités actuellement par la SBEE pour le réglage des protections du réseau « COTONOU EST ».

Tableau 2 : Courants de court-circuit maximum sur les rames de la Centrale d'Akpakpa (kA) dans la configuration actuelle du réseau

COURANTS DE COURT-CIRCUIT MAXIMUM SUR LES RAMES DE LA CENTRALE D'APKPAKPA (kA)						
Types de défaut	Couplage 1 et 2			Couplage1, Couplage2 fermés	Charges alimentées par TE1	Charges alimentées par TE2
	Rame 1	Rame 2	Rame 3			
Défaut triphasé	6,19	8,54	8,54	12,43	6,19	8,54

Tableau 3 : *Courants de court-circuit maximum dans le réseau Cotonou-Est après reconfiguration*

COURANTS DE COURT-CIRCUIT MAXIMUM REEL (kA)					
Type défaut	Localisation du défaut	1 et 2 ouverts	1 et 2 fermés	Charges alimentées par TE1	Charges alimentées par TE2
triphasé	Nœud de la charge L-142830	44,2	46,17	42	44,203

Tableau 4 : *Comparaison entre les courants de court-circuit minimum avant et après reconfiguration*

Rames	Départs	Valeur réelle (kA)	En bout de ligne des départs (kA)
1	COT.1	1,14	2,605
	COT.4	1,37	2,87
	St Michel	2,27	2,88
3	D 1	0,94	1,17
	D 2	1,31	2,33
2	COT.5	2,11	2,27
	COT.3	2,26	3,28
	COT.6	2,12	2,2
	SONACI	2,25	2,93

Tableau 5 : *Plage des courants de court-circuit par départ du poste source d'Akpakpa*

Rames	Départs	Valeur réelle minimale (kA)	Valeur réelle maximale (kA)
1	COT.1	1,14	42,13
	COT.4	1,37	29,83
	St Michel	2,27	20,10
3	D 1	0,94	42,12
	D 2	1,31	15,61
2	COT.5	2,11	20,55
	COT.3	2,26	21,20
	COT.6	2,2	21,27
	SONACI	2,25	11,08

4. Discussion

En analysant les **Tableaux 2 et 3**, on remarque que le courant de court-circuit maximal réel est beaucoup plus grand que celui obtenu en supposant que les défauts se produisent sur les rames de la centrale. La valeur du courant maximal de court-circuit est de 12,4 kA pour le réseau dans son état actuel et 42, 17 kA après reconfiguration. Le **Tableau 4** nous montre les valeurs de courant de court-circuit minimal calculé numériquement en comparaison avec celui déterminé en bout de ligne des départs. Le **Tableau 5** nous donne la plage des vraies valeurs des courants de court-circuit selon les différents départs du poste source d'Akpakpa. Ces résultats montrent que le calcul analytique des courants de court-circuit n'est valable que pour les réseaux industriels, ceux ne disposent que de quelques transformateurs et les charges sont aussi maîtrisées. Quant aux réseaux électriques de distribution publique, la méthode numérique est plus indiquée. Dans le cas précis les auteurs ont utilisé le logiciel NEPLAN pour aboutir aux résultats contenus dans le tableau 5 qui constituent des résultats concrets et exploitables pour la Société Béninoise d'Energie Electrique (SBEE) au Bénin.

5. Conclusion

En conclusion, il est prouvé par les résultats obtenus qu'il soit impossible de calculer analytiquement les courants de court-circuit dans un réseau électrique lorsqu'il s'agit d'un réseau de distribution publique. Le grand écart entre les valeurs obtenues par les deux méthodes, montre combien de fois les impédances des charges, des lignes et des transformateurs du réseau influent sur les courants de court-circuit. Le logiciel NEPLAN est l'outil par excellence pour nos simulations.

Références

- [1] - M. A. PAI, "Computer Techniques in Power System Analysis", Mc-Graw Hill Education, (1979)
- [2] - O.E.ROENNSPIESS, A.E.EFTHYMIADIS-"A comparison of static and dynamic short-circuit analysis procedures", IEEE, Paper No. PCIC-88-13, (1998) pp 69-75.
- [3] - An American National Standard, "IEEE Application Guide for AC High Voltage Circuit Breakers Rated and Symmetrical Current Basis", October, 1988.
- [4] - International Standard IEC 60909, "Short-Circuit current in three phases. AC. systems", July (2001).
- [5] - Guide de conception MT, Guide technique Merlin Gerin, Schneider Electric Guide UTE C 15-105
- [6] - R. CHERKAOUI- "Méthodes heuristiques pour la recherche de configurations optimales d'un réseau électrique de distribution", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, (1992)
- [7] - S. K. GOSWANI, S.K. BASAU, "A new algorithm for the configuration of distribution feeders for loss minimization, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 7, no. 3? PP 1484-1491, Jul. (1992)
- [8] - D. SHIRMOHAMMADI and K.W. HONG, "Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line loss reduction", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 7, no. 1, PP 1492-1498, Apr. (1989)
- [9] - J. Z. ZHU, C. S. CHANG, "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm", Elect. Power Syst. Res, vol. 62, pp 37-42, (2002)